

УДК 533.924; 620.22.8

doi:10.20998/2413-4295.2019.10.03

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ НА ВОЗДУХЕ И В КОНТРОЛИРУЕМОЙ АТМОСФЕРЕ (В ВАКУУМЕ)

В. А. ЛЕБЕДЕВ^{1*}, С. А. ЛОЙ²

¹ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, УКРАИНА

² Национальный кораблестроительный университет им. адмирала Макарова, г. Николаев, УКРАИНА

*e-mail: lebedevvladimir@ukr.net

АННОТАЦИЯ Одним из наиболее производительных, технологичных и эффективных способов получения защитных покрытий на элементах газотурбинных двигателей, установок и других видов техники от воздействия значительных динамических нагрузок, агрессивных сред, высоких температур и т. п. является плазменное напыление. Основным элементом, который обеспечивает необходимые характеристики напыляемым частицам, является плазматрон. К настоящему времени в мире разработано большое количество плазматронов различных конструкций, мощности, способов охлаждения, каждая из которых имеет как свои преимущества, так и недостатки. В большинстве конструкций плазматронов материал, который напыляется, подаётся в плазменный поток радиально через канал, близкий к срезу сопла и это отрицательно влияет на качество покрытия (неудовлетворительное сцепление, повышенная пористость и др.). Кроме этого коэффициент использования порошкового материала из-за неравномерного нагрева достаточно низок. Для повышения достаточного нагрева повышают мощность плазматрона, что ведёт к снижению его ресурса работы. В работе предложены направления модернизации существующих конструкций плазматронов, которые направлены на повышение качества напыленного слоя, увеличение мощности процесса, повышение ресурса работы оборудования. При этом выделяются конструктивные решения связанные с охлаждением основных узлов плазматрона, которые снижают тепловую нагрузку с устройства в целом. Рассмотрены технические решения, позволяющие обеспечить более эффективный и равномерный прогрев напыляемого материала, что также ведёт к более качественному нанесению покрытий различного назначения, увеличению коэффициента использования порошка. Уделено внимание насадкам, которые конструктивно связаны с самим плазматроном. Насадки существенно улучшают эксплуатационные свойства плазматронов. Частицы порошка в такой лучше прогреваются и имеют большую скорость движения, ускоряются, что также повышает качество покрытия. Экспериментальные исследования позволяют определить наиболее эффективно работающие размеры насадок. Предложенная и испытанная конструкция насадки имеет систему охлаждения и выполнена из определённых материалов, среди которых нержавеющие и изолирующие. Лабораторные испытания плазматрона разработанной конструкции при модернизации показали, что время непрерывной его работы составляет не менее 30 часов при мощности около 50 кВт при высоком качестве напыления.

Ключевые слова: плазменное напыление; среда; плазматрон; особенности; конструкция; анализ; результаты

MODERNIZATION OF THE PLASMATRON FOR DUSTING ON AIR AND IN CONTROLLED ATMOSPHERE (VACUUM)

V. LEBEDEV¹, S. LOY²

¹The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, UKRAINE

²National Shipbuilding University. Admiral Makarov, Nikolaev, UKRAINE

ABSTRACT One of the most productive, technological and efficient ways to obtain protective coatings on gas turbine engine elements, plants and other types of equipment from exposure to significant dynamic loads, corrosive media, high temperatures, etc., is plasma spraying. The main element that provides the necessary characteristics of the sprayed particles is the plasma torch. To date, a large number of plasma torches of various designs, power, cooling methods have been developed in the world, each of which has its own advantages and disadvantages. In most of the plasma torch designs, the material that is sprayed is fed into the plasma stream radially through the channel close to the nozzle section and this negatively affects the quality of the coating (poor adhesion, increased porosity, etc.). In addition, the utilization rate of the powder material due to uneven heating is quite low. To increase the sufficient heating, the power of the plasmatron is increased, which leads to a decrease in its service life. In this paper, the directions of modernization of the existing designs of plasmatrons, which are aimed at improving the quality of the sprayed layer, increasing the power of the process, increasing the service life of the equipment, are proposed. In this case, the constructive solutions associated with the cooling of the main components of the plasma torch, which reduce the thermal load from the device as a whole, will stand out. Considered technical solutions to ensure more efficient and uniform heating of the sprayed material, which also leads to better coating of various applications, an increase in the utilization rate of the powder. Attention is paid to nozzles that are structurally related to the plasma torch itself. Nozzles significantly improve the performance properties of plasma torches. Powder particles in such a warm up better and have greater speed of movement accelerated, which also improves the quality of the coating. Experimental studies allow to determine the most effective working sizes of nozzles. The proposed and tested design of the nozzle has a cooling system and is made of certain materials including stainless and insulating. Laboratory tests of the plasma torch of the developed design during modernization showed that the time of its continuous operation is at least 30 hours at a power of about 50 kW with high quality of spraying.

Keywords: plasma spraying; medium; plasmatron; features; construction; analysis; results.

Введение

Восстановление и упрочнение рабочих органов газотурбинных двигателей и установок с

использованием плазменного напыления в настоящее время распространённый технологический процесс, который постоянно совершенствуется как по материалам, так и по техническим средствам [1,2].

Особое внимание уделяется подготовительным операциям и анализу полученных результатов – качество напыления [3].

Используемое при этом оборудование – комплектные установки для плазменного напыления [4] создано и создаётся с задачами повышения качества напыленного слоя, минимизации затрат по материалам и энергии, повышению производительности выполнения работ на различных стадиях подготовки и ведения процесса. При этом особое внимание уделяется основному устройству установок – плазматрону. Выделяются недостатки существующих плазматронов и ищутся эффективные способы их устранения на уровне изменения (улучшения) конструкций, как отдельных узлов так и плазматронов в целом [5].

Цель работы

Целью настоящей работы является рассмотрение некоторых направлений совершенствования конструкций плазматронов различного назначения (напыление на воздухе, в контролируемой атмосфере, комбинированного применения).

Достижение указанной цели в настоящем материале проводится на примерах конструкций реальных плазматронов.

Изложение основного материала

Рассмотрим для примера конструкции двух основных типов по среде применения плазматронов с элементами усовершенствования их узлов.

Плазматрон является устройством, которое определяет качественные показатели работы установки для напыления в открытой атмосфере (на воздухе) при высоких показателях надёжности и минимизации энергии и ресурсозатрат [6].

Опыт эксплуатации плазматрона одной из наиболее распространённых конструкций плазматронов ПН-14М при напылении теплозащитных покрытий показал, что он не обеспечивает необходимой (заданной) мощности дуги (до 40 кВт) и имеет ряд конструктивных недостатков: каналы для подачи порошка часто забиваются; большое сопротивление прохождению охлаждающей воды; низкая устойчивость уплотнительных элементов; в конструкции плазматрона не предусмотрено его крепление к вакуумной камере.

Следует особо отметить, что увеличение мощности процесса без целенаправленного изменения его конструкции [7] для более интенсивного нагрева напыляемых частиц приводит к снижению времени эксплуатации плазматрона.

Для устранения указанных недостатков, на базе плазматрона ПН-14М разработана усовершенствованная его конструкция, которая представлена на рис. 1.

Следует отметить, что в отличие от выпускаемых серийно плазматронов рассматриваемая конструкция имеет ряд преимуществ, в том числе значительно больший ресурс при той же мощности за

счет ряда межэлектродных вставок, повышающих напряжение плазменного процесса.

В существующей конструкции плазматрона охлаждающий поток воды проходит через анод и затем последовательно через кольцевые каналы каждой вставки. Такое направление потока обосновывается конструкцией втулки (капролон), где каждому кольцевому каналу вставок соответствует перегородка и окно в капролоновой втулке. Для улучшения водоохлаждения межэлектродных вставок изменена конструкция капролоновой вставки, в которой вместо окон для перетекания воды последовательно по вставкам выполнены сквозные каналы.

Устойчивость катода во многом определяется чистотой плазмообразующих газов, интенсивностью охлаждения и его геометрическими параметрами [8].

Вольфрамовый катод крепится в цанговый зажим, позволяющий легко и своевременно устанавливать необходимую длину рабочей части.

Следует отметить, что слабым местом плазматрона ПН-14М является узел подачи порошка. Уплотнительные резинки, из-за перегрева, часто выходят из строя, что ведет к нарушению герметизации дуговой канала и вызывает короткое замыкание межэлектродных вставок.

Во избежание перегрева уплотнений выходного сопла в месте подачи порошка изменена конструкция корпуса анода и выходного сопла.

При увеличении внутреннего диаметра корпуса анода ширина каналов для охлаждающей воды соответственно увеличивается. Кроме того, вместо одного отверстия для прохождения воды из анода в корпус плазматрона в разработанной конструкции предусмотрено три канала, что снижает тепловую нагрузку на участке подачи порошка за счет интенсивного отвода тепла.

В исходном сопловом элементе выполнены канавки, обеспечивающие необходимый доступ воды к резиновым уплотнительным элементам.

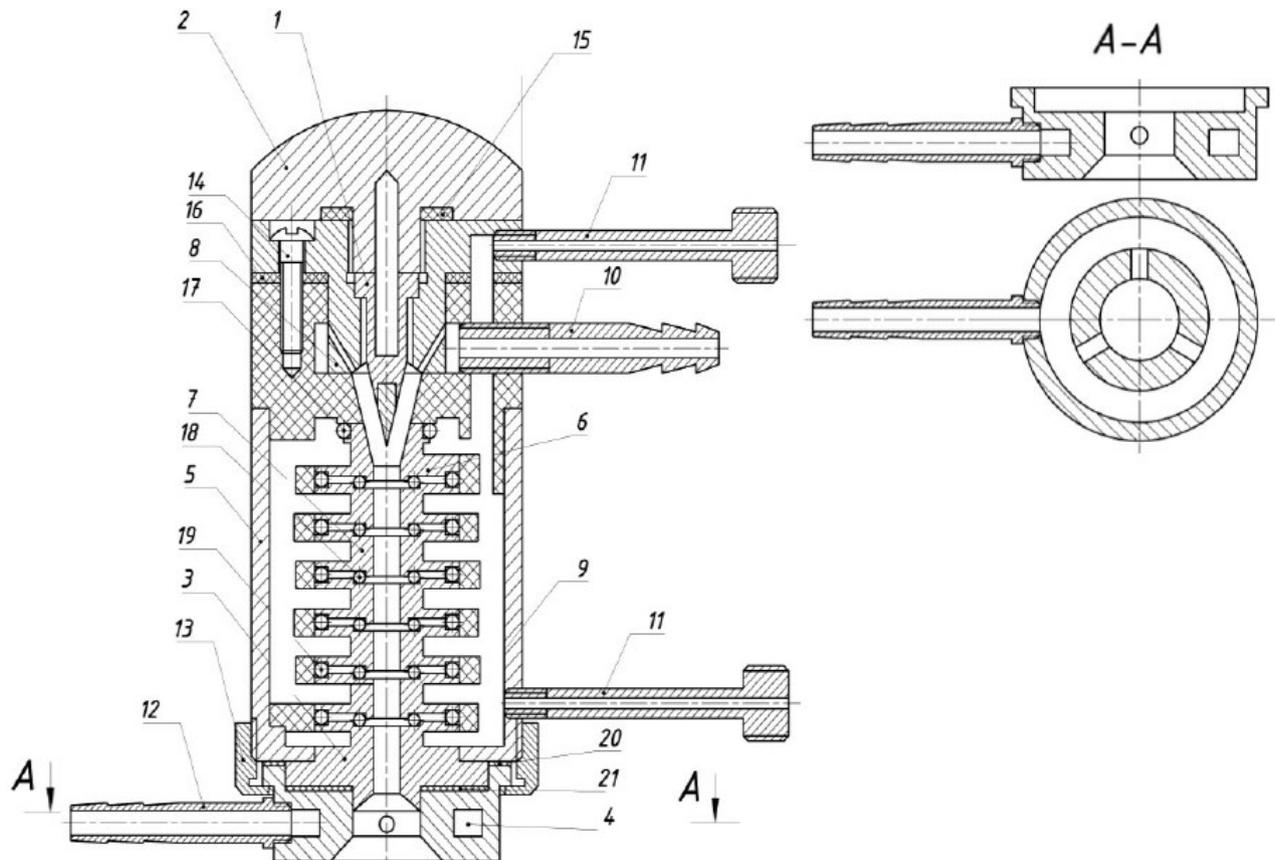
Отмеченные изменения в конструкции плазматрона существенно улучшили условия отвода тепла и значительно (в 2-3 раза) увеличили стойкость уплотнений выходного сопла, а также межэлектродных вставок. Заметим, что конструкция предсопловой вставки отличается от других межэлектродных вставок утолщенным буртиком. При этом межэлектродные вставки охлаждаются водой проходящей по капролоновому изолятору.

В новой конструкции в отличие от исходной (при давлении на входе 0,85 МПа расход охлаждающей воды составляет 16 л / мин), появившаяся возможность увеличения давления до 0,95 МПа приводит к росту расхода до 19 л / мин. При таком охлаждении данная конструкция надежно работает при мощности до 40 кВт.

Существенным преимуществом предложенной изменённой конструкции плазматрона является возможность использования в качестве плазмообразующего газа смесь аргона с высокоэнтальпийными газами (азотом или гелием). При этом теплонагруженность элементов плазматрона не приводит к выходу из строя резиновых уплотнительных элементов. Порошок в

данном случае подается в анодное пятно и некоторое время находится в канале сопла, за счет чего улучшается прогрев частиц в струе плазмы, что особенно важно при напылении в разреженной контролируемой атмосфере, где скорость частиц

достигает 800-1000 м / с. Эта особенность позволяет использовать модернизированный плазматрон как на воздухе, так и в контролируемой (разреженной) среде, что, по нашему мнению, является неоспоримым преимуществом предлагаемой конструкции.



1 – катод; 2 – крышка; 3 – анод; 4 – сопло; 5 – стальной кожух; 6 – входная секция междуэлектродной вставки; 7 – секция междуэлектродной вставки; 8 – втулка; 9 – корпус катода; 10 – трубка подвода воздуха; 11 – трубка подвода и отвода охлаждающей воды; 12 – штуцер подвода порошка; 13 – винт стяжной; 14 – гайка стяжная; 15–21 – прокладка

Рис. 1 – Конструкция плазматрона

Следует отметить, что значительное число технологических процессов с использованием плазматронов в различных конструкциях установок выполняется с применением порошковых материалов, вводимых в плазменную струю. Однако, как показывают проведенные эксперименты и практическое применение, далеко не весь порошок подается в плазменную струю, плавится и испаряется, несмотря на его высокое теплосодержание. Причинами низкой эффективности нагрева, обеспечивающего прочность сцепления между слоями и основой в технологиях напыления в наибольшей степени зависит от температуры и скорости частиц, транспортируемых плазменным потоком, в том числе, могут быть: малое время пребывания частиц в плазменной струе, сложность введения порошка в центральную зону струи. Указанное выше является следствием неправильного ввода порошка. При этом немаловажным обстоятельством является проскальзывание его в пристеночной области и

образованием слоёв порошка и как следствие - неполное проплавление порошка.

Для улучшения условий проплавления порошка изменена геометрия сопла и порошок подаётся под углом 110°, в результате чего за счет большего времени пребывания частиц в струе улучшается теплообмен в системе аргон-порошок. При этом скорость частиц несколько уменьшится, но при напылении в вакууме, где сопротивление среды мало, этот фактор не сыграет определяющего значения из-за роста скорости частиц по сравнению с напылением на воздухе. Замену угла ввода (90° ... 110°) возможно провести с некоторым изменением геометрии выходного сопла. В результате конструкторской разработки предложено выходное сопло, которое имеет несколько большую длину по сравнению с тем, что есть. Кроме того, изменён угол раскрытия сопла с 90 ° до 60 °. Меньший угол раскрытия позволяет улучшить направленность струи и соответственно увеличится коэффициент использования порошкового материала.

Рассмотренные элементы модернизации плазмотрона позволили обеспечить сравнительно небольшой расход плазмообразующего газа в рабочих режимах. Он обеспечивает необходимую рабочую мощность, достаточную для прогрева частиц в плазменной струе при напылении в на воздухе и в контролируемой среде.

На фотографии рис. 2 представлена реальная конструкция модернизированного плазмотрона после некоторого периода его эксплуатации в комплекте установки для плазменного напыления.

Рассмотренная модернизация плазмотрона была продолжена ещё в одном варианте конструкции установки для высокотемпературного распыления применительно, в частности, к напылению

уплотнений. Этот более полный вариант модернизации известен как плазмотрона ПН-7М

Результаты исследований состава плазменных уплотнительных покрытий, а также опыт эксплуатации плазмотрона ПН-14М с элементами модернизации, рассмотренными выше, показали, что они имеют не достаточные когезионные и адгезионные свойства, а это снижает стойкость и ресурс покрытия. Одна из причин этого явления это всё ещё низкая степень проплавления частиц порошка, вызванная недостаточной мощностью применяемого плазмотрона. Особенно отчетливо проявляется этот эффект при напылении в разреженной контролируемой атмосфере и в случае, когда в состав порошковой композиции входят тугоплавкие добавки ZrO_2 [9].



Рис. 2 – Частично модернизированный плазмотрон для широкого применения

Для устранения указанных недостатков, на базе плазмотрона ПН-14М проведена более глубокая модернизация плазмотрона и разработана его усовершенствованная конструкция - ПН-7М. Для повышения мощности диаметр канала плазмотрона увеличили с 6 до 10 мм с соответствующими изменениями размеров межэлектродных вставок, входного и выходного сопел, диаметр катода, капронового изолятора и корпусов анода и катода. Увеличение диаметра канала ведет к уменьшению тепловой нагрузки на межэлектродные вставки и выходное сопло плазмотрона при достаточном расходе охлаждающей воды. Изменение размеров элементов плазмотрона увеличило длину канала с 80 до 130 мм, что позволило повысить мощность плазмотрона за счет увеличения напряжения на дуге, а это снижает эрозию выходного сопла и тепловую нагрузку на токоведущие элементы. Стойкость катода во многом определяется чистотой плазмообразующих газов, интенсивностью охлаждения и его геометрическими параметрами. В рассматриваемой

конструкции решены задачи улучшения охлаждения катода и на основании экспериментальных исследований оптимизированы геометрические размеры.

Вольфрамовый катод крепится в цанговом зажиме, что позволяет легко и своевременно устанавливать необходимую длину рабочей части. С целью повышения стойкости дуги необходим повышенный (по сравнению с предыдущей конструкцией) расход плазмообразующего газа, что улучшает охлаждение катода.

Следует отметить, что недостатком ранее рассмотренной конструкции является узел подачи порошка.

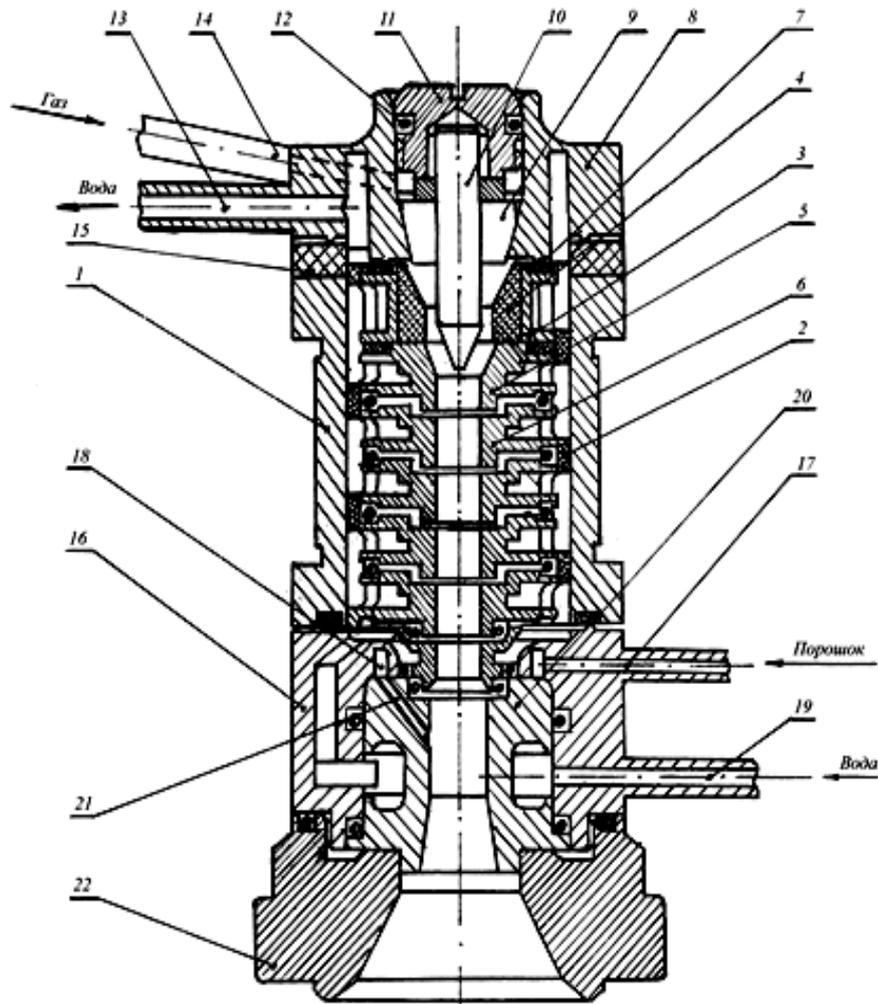
Уплотнительные резинки, из-за перегрева, часто выходят из строя, что ведет к нарушению герметизации дугового канала к короткому замыканию межэлектродных вставок. Для избегания перегрева уплотнений выходного сопла в месте подачи порошка изменена конструкция корпуса анода и выходного сопла. При увеличении внутреннего

диаметра корпуса анода ширина каналов для охлаждающей воды соответственно увеличивается. Кроме того, вместо одного отверстия для прохождения воды из анода в корпус плазмотрона в разработанной конструкции предусмотрено три канала, что снижает температуру нагрева на участке подачи порошка за счет более интенсивного охлаждения. Межэлектродные вставки охлаждаются при прохождении воды по капролоновому изолятору. Толщина стенки изолятора плазмотрона увеличена до 5мм. В выходном сопле выполнены канавки, обеспечивающие дополнительный отвод тепла. При

таком охлаждении данная конструкция надежно работает при мощности до 50 кВт.

Порошок в данной конструкции случае подается в анодное пятно и некоторое время находится в канале сопла, за счет чего улучшается прогрев частиц в струе плазмы, что особенно важно при напылении в разреженной контролируемой атмосфере, где скорость частиц достигает 800...1000м/с.

Конструкция модернизированного плазмотрона представлена на рис. 3.



1 – корпус; 2 – изолятор; 3 – вставка; 4 – втулка изоляционная; 5 – входная секция межэлектродной вставки; 6 – секция межэлектродной вставки; 7 – прокладка; 8 – корпус катода; 9 – цанга; 10 – катод; 11 – пробка; 12 – кольцо уплотнительное; 13 – трубка отвода воды; 14 – трубка подачи плазмообразующего газа; 15 – кольцо изоляционное; 16 – корпус анода; 17 – трубка подачи порошка; 18 – кольцевая полость подачи порошка; 19 – трубка подачи воды; 20 – выходное сопло; 21 – канал подачи порошка; 22 – накидная гайка

Рис. 3 – Плазмотрон модернизированный

Анализ результатов модернизации показал, что данный плазмотрон имеет сравнительно небольшой расход плазмообразующего газа на рабочих режимах. Он обеспечивает необходимую рабочую мощность, достаточную для прогрева частиц в плазменной струе в динамическом вакууме.

Существенным улучшением эксплуатационных свойств плазмотрона является применение в его конструкции специально разработанной насадки.

Плазменная струя нагревает, ускоряет и направляет частиц порошкообразного материала в процессе плазменного напыления. При этом решающую роль играют плотность струи и её температура.

Рассмотрим основные задачи разработки и конструирования насадки.

При напылении в глубоком вакууме, когда под действием разрежения и влияния системы

откачивания, а также большом удалении плазматрона, плазменная струя принимает размытые формы и отклоняется на пути к подложке, поэтому необходимо конструктивно решить вопрос об ограничении формы плазменной струи с целью его уплотнения и придания ему нужного направления [10]. Эту задачу можно решить с помощью трубы-насадки, присоединенной к плазматрону, но электрически с ним не связанной. Стенки трубы-насадки ограничат диаметр плазменной струи, его плотность и температура повысятся. Частицы порошка в такой насадке лучше прогреваются и более ускоряются, а, следовательно, повысится качество покрытия.

В верхней части труба-насадка должна иметь некоторое расширение, которое выполняет роль камеры смешения, необходимость которой связана со следующим: поле температур на выходе из плазматрона неравномерное, а пульсации мощности дуги большие. В камере смешения происходит

гашение пульсации температуры, давления и скорости, эффективнее происходит и перемешивание материала порошка плазмой. Напыляемый материал в большей степени переходит из гетерогенного состояния в гомогенный. Все это позволит улучшить кинематические и динамические характеристики потока в рабочей части трубы-насадки.

Материал такой трубы должен иметь хорошую теплопроводность. Внутреннюю поверхность желательно хромировать, а на внешней выполнить продольные ребра для улучшения теплоотдачи и жесткости.

Для определения оптимальных размеров насадки был проведен ряд экспериментов, а также использованы некоторые методы математического моделирования плазматронов [11]. Применяли металлические трубки различных длин и диаметров. Параметры режима и экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры режимов напыления и результаты экспериментов

№ п/п	Размеры насадки		Рабочее давление в камере, Па	Ток дуги, А	Напряжение дуги, В	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Результат
	Внутренний, мм	Длина, мм					
1	105	350	39,9	300	120	26	Покрытие не получено
2	94	620	39,9	230	115	24	Проплавление самих мелких частиц
3	70	700	39,9	300	125	35	Проплавление самих мелких частиц
4	38	800	39,9	300	125	38	Получено покрытие, есть бочкообразность газового потока
5	26	950	39,9	280	120	25	Увеличение бочек выходящих из насадки
6	26	1050	39,9	270	125	25	Получено покрытие. Пламя за границы насадки почти не выходит,
7	26	600	39,9	250	115	26	Основная масса частиц проплавлялась. Есть покрытие толщиной до 3мм
8	26	300	39,9	300	115	24	Значительное расширение потока. Покрытие без нагретых частиц

Покрытия, которые были получены при использовании насадки с диаметром 26 мм и длиной 600 мм, имеют достаточно малую пористость 0,3%, частицы порошка в струе проплавлились полностью.

В общем можно сказать, что оптимальная длина насадки при ее внутреннем диаметре 26 мм находится в пределах 600-900 мм, для рабочего давления в камере 13,3-39,9 Па, но для различных порошков эта величина не является постоянной.

Исследование возможности использования насадки с соплом Витошинского показало, сопло быстро нагревается до высоких температур.

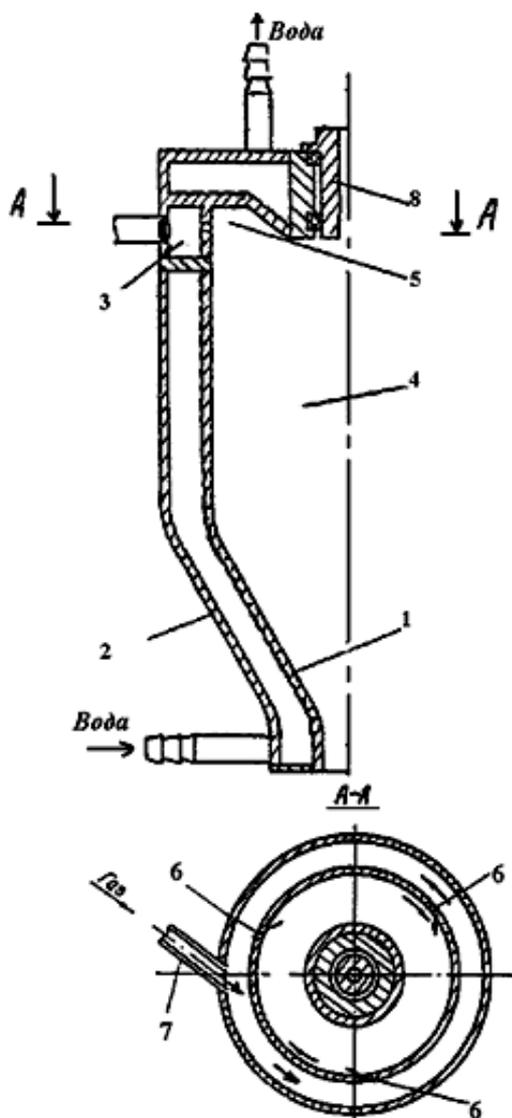
Для обеспечения работоспособности насадок их необходимо изготавливать водоохлаждаемыми.

С целью повышения коэффициента использования порошка необходимо выполнить в верхней торцевой части центрального канала с переменным сечением отверстие для создания свободного вихря с кольцевым углублением, охватывающим сопло плазматрона. Боковые каналы, служащие для подачи газа и прилегающие к центральному каналу, расположены симметрично в плоскости, перпендикулярной оси центрального канала, выше среза сопла и имеют тангенциальное направление.

Свободный вихрь увлекается газопорошковым потоком, заканчивается и образует на внутренней поверхности трубы переменного сечения

пограничный кольцевой поток, который предотвращает интенсивный теплоотвод от высокотемпературного газопорошкового потока и препятствует налипанию частиц на стенки центрального канала.

Конструкция разработанной насадки представлена на чертеже рис. 4. Насадка содержит трубу переменного сечения 1, кожух 2 для прокачки охлаждающей среды, который охватывает трубку с небольшим зазором. Часть зазора с перегородками образует кольцевую полость 3, охватывающую центральный канал 4, который имеет кольцевое углубление 5. К центральному каналу 4 примыкают боковые каналы 6. Газ, подаваемый через трубку 7, нагревается в кольцевой полости 3 за счет теплопередачи от высокотемпературного газопорошкового потока, который вытекает из плазматрона через сопло 8, и, проходя через каналы 6, в кольцевом углублении формирует свободный вихрь.



1 - труба переменного сечения; 2 - кожух;
3 - кольцевая полость; 4 - центральный канал;
5 - кольцевое углубление; 6 - боковые каналы

Рис. 4 – Насадка для напыления в разреженной среде

Предложенная конструкция насадки позволяет при низких давлениях иметь большой коэффициент использования материала, улучшает проплавления частиц порошка и направляет плазменную струю.

Обсуждение результатов

Модернизированные плазматроны с новыми конструктивными решениями для напыления в атмосфере и в вакууме, исходя из анализа уже существующих разработок, обеспечивают [12] новые техники – технологические возможности комплектных установок для плазменного напыления широкого спектра узлов и деталей.

Лабораторные испытания плазматронов разработанной конструкции показали, что время непрерывной работы составляет не менее 30 часов при мощности около 50 кВт, что, в итоге, является основой энерго- и ресурсосбережения в технологиях и оборудовании плазменного напыления.

Выводы

Показано, что основой модернизации плазматрона может быть рациональная многосекционная его конструкция. Снижена термонагруженность узлов плазматрона, что обеспечивает его более длительную эксплуатацию и применение более производительных режимов работы. Снижение теплонагруженности обеспечивает усовершенствованная конструкция плазматрона, благодаря чему он лишен ряда недостатков (каналы для подачи порошка часто забиваются, большое сопротивление прохождению охлаждающей воды; низкая устойчивость уплотнительных элементов). На основе элементов математического моделирования и экспериментальных исследований разработана конструкция насадки для плазматрона, которая улучшает проплавления частиц порошка и направляет плазменную струю при напылении в разреженной среде с низким давлением.

Список литературы

1. Будиновский, С. А. Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор) / С. А. Будиновский, Д. А. Чубаров, П. В. Матвеев // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – S5. – С. 38–44. – doi: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-38-44.
2. Effects of Space Conditions on Materials / Ed. A. I. Akishin. – New York: Nova Science Publ., 2001. – 199 p.
3. Григорьев, С. Н. Новые возможности технологии плазменного напыления износостойких покрытий / С. Н. Григорьев, О. Б. Ковалев, В. И. Кузьмин, А. А. Михальченко, Н. Г. Соколова, В. М. Фомин // *Трение и износ*. – 2013. – Т. 34, № 3. – С. 221–226.
4. Pfender, L. F. Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies / Edited by Solonenko O.P.: Cambridge International Science Publishing, Vol. 1: Plasma Torches. Basic Studies and Design. – 2003. – P. 20–41.

5. **Михеев, А. Е.** Плазматрон для нанесения покрытий из тугоплавких дисперсных материалов / **А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина, И. О. Якубович** // *Сибирский журнал науки и технологий*. – 2018. – Т. 19, № 2. – С. 365–372.
6. **Кузьмин, В. И.** Повышение эффективности плазменного напыления порошковых покрытий / **В. И. Кузьмин, Е. В. Картаев, С. П. Ващенко, Д. В. Сергачёв, Е. Е. Корниенко** // *Вестник югорского государственного университета*. – 2014. – Вып. 2 (33). – С. 7–14.
7. **Птицын, С. В.** Установка для плазменного нанесения покрытий / **С. В. Птицын, Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев**. МГТУ, 2006.
8. Плазменное напыление. URL: http://profdetal.ru/?Tehnologii_XXI:Plazmennoe_napylenie. (Дата обращения: 10.09.2014).
9. **Игнатик, А. В.** Плазменные устройства для нанесения покрытий разного функционального назначения / **А. В. Игнатик, А. И. Иванов, А. Н. Смирнов, В. С. Шориков** // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Технические науки*. – 2010. – С. 10–11.
10. **Барвинок, В. А.** Плазма в технологии, надежность, ресурс / **В. А. Барвинок**. М.: Наука и технологии, 2005. – 452 с.
11. **Дресвин, С. В.** Основы математического моделирования плазматронов. / **С. В. Дресвин, Д. В. Иванов**. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, ч. 1, 2004. – 230 с.
12. **Guessasma, S.** Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example / **S. Guessasma, G. Montavon., C. Coddet** // *Computational Materials Science*. – 2004. – Vol. 29 (3). – P. 315-333. – doi: 10.1016/j.commatsci.2003.10.007.
2. **Effects of Space Conditions on Materials** / Ed. **A. I. Akishin**. – New York: Nova Science Publ., 2001, 199.
3. **Grigorev, S. N., Kovalev, O. B., Kuzmin, V. I., Mihalchenko, A. A., Sokolova, N. G., Fomin, V. M.** Novyie vozmozhnosti tehnologii plazmennogo napyleniya iznosostoykikh pokrytityi [New features of plasma spraying technology for wear-resistant coatings]. *Trenie i iznos*, 2013, **34**, 3, 221–226.
4. **Pfender, L. F.** Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies. Edited by Solonenko O.P.: Cambridge International Science Publishing, Vol. 1: Plasma Torches. Basic Studies and Design, 2003, 20–41.
5. **Mihev, A. E., Girn, A. V., Ravodina, D. V., Yakubovich, I. O.** Plazmotron dlya naneseniya pokrytityi iz tugoplavkikh dispersnykh materialov [Plasma torch for coating of refractory dispersed materials]. *Sibirskiy jurnal nauki i tehnologii*, 2018, **19**, 2, 365–372.
6. **Kuzmin, V. I., Kartayev, E. V., Vachenko, S. P., Sergachyev, D. V., Kornienko, E. E.** Povyishenie effektivnosti plazmennogo napyleniya poroshkovykh pokrytityi [Improving the efficiency of plasma spraying of powder coatings]. *Vestnik yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, **2** (33), 7–14.
7. **Ptitsyn, S. V., Chosov, Yu. S., Zverev, E. A.** Ustanovka dlya plazmennogo naneseniya pokrytityi [Plasma Coater]. МГТУ, 2006.
8. Плазменное напыление. Available at: http://profdetal.ru/?Tehnologii_XXI:Plazmennoe_napylenie. (Data obrascheniya: 10.09.2014).
9. **Ignatik, A. V., Ivanov, A. I., Smirnov, A. N., Shorikov, V. S.** Plazmennyye ustroystva dlya naneseniya pokrytityi raznogo funktsionalnogo naznacheniya [Plasma devices for coating various functional purposes]. *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики. Tehnicheskie nauki*, 2010, 10–11.
10. **Barvinok, V. A.** Plazma v tehnologii, nadejnost, resurs [Plasma in technology, reliability, resource]. М.: Наука и технологии, 2005, 452.
11. **Dresvin, S. V., Ivanov, D. V.** Osnovy matematicheskogo modelirovaniya plazmotronov [Basics of mathematical modeling of plasmatrons]. СПб, Изд-во Политехн. ун-та, ч. 1, 2004, 230.
12. **Guessasma, S., Montavon, G., Coddet, C.** Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example. *Computational Materials Science*, 2004, **29** (3), 315-333, doi: 10.1016/j.commatsci.2003.10.007.

References (transliterated)

1. **Budinovskiy S.A., Chubarov D.A., Matveev P.V.** Sovremennyye sposoby naneseniya teplozaschitnykh pokrytityi na lopatki gazoturbinykh dvigateley (obzor) [Modern methods of applying heat-shielding coatings on the blades of gas turbine engines (review)]. *Aviatsionnyye materialy i tehnologii*, 2014, **S5**, 38–44, doi: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-38-44.

Сведения об авторах (About authors)

Лебедев Владимир Александрович – доктор технических наук, главный конструктор ГП ОКТЬ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины; г. Киев; ORCID: 0000-0002-0006-3576; e-mail: lebedevvladimir@ukr.net.

Vladimir Lebedev – Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, ORCID: 0000-0002-0006-3576; e-mail: lebedevvladimir@ukr.net.

Лой Сергей Анатольевич – доцент, Национальный кораблестроительный университет им. адмирала Макарова. г. Николаев; e-mail: valpaton@ukr.net.

Sergey Loy – Associate Professor, National Shipbuilding University of Admiral Makarov, Nikolaev; e-mail: valpaton@ukr.net.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Лебедев, В. А. Модернизация плазматрона для напыления на воздухе и в контролируемой атмосфере (в вакууме) / **В. А. Лебедев, С. А. Лой** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 10 (1335). – С. 21–29. – doi:10.20998/2413-4295.2019.10.03.

Please cite this article as:

Lebedev, V., Loy, S. Modernization of the plasmatron for dusting on air and in controlled atmosphere (vacuum). *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **10** (1335), 21–29, doi:10.20998/2413-4295.2019.10.03.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лебедєв, В. О. Модернізація плазмотрона для напилення на повітрі й у контрольованій атмосфері (у вакуумі) / **В. О. Лебедєв, С. А. Лой** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 10 (1335). – С. 21-29. – doi:10.20998/2413-4295.2019.10.03.

АНОТАЦІЯ Одним з найбільш продуктивних, технологічних і ефективних способів отримання захисних покриттів на елементах газотурбінних двигунів, установок і інших видів техніки від впливу значних динамічних навантажень, агресивних середовищ, високих температур і т. п. є плазмового напилення. Основним елементом, який забезпечує необхідні характеристики напилюваним часткам, є плазмотрон. До теперішнього часу в світі розроблено велику кількість плазмотронів різних конструкцій, потужності, способів охолодження, кожна з яких має як свої переваги, так і недоліки. У більшості конструкцій плазмотронів матеріал, який напилюється, подається в плазмовий потік радіально через канал, близький до зрізу сопла і це негативно впливає на якість покриття (незадовільний зчеплення, підвищена пористість і ін.). крім цього коефіцієнт використання порошкового матеріалу з-за нерівномірного нагрівання досить низький. Для підвищення достатнього нагрівання підвищують потужність плазмотрона, що веде до зниження його ресурсу роботи. В роботі запропоновані напрями модернізації існуючих конструкцій плазмотронів, які спрямовані на підвищення якості напилюваного шару, збільшення потужності процесу, підвищення ресурсу роботи обладнання. При цьому виділяться конструктивні рішення пов'язані з охолодженням основних вузлів плазмотрона, які знижують теплове навантаження в пристрої в цілому. Розглянуто технічні рішення дозволяють забезпечити більш ефективний режим роботи і рівномірне прогрівання напилюваного матеріалу, що також веде до якіснішого нанесення покриттів різного призначення, збільшення коефіцієнта використання порошку. Приділено увагу насадкам, які конструктивно пов'язані з самим плазмотроном. Насадки суттєво покращують експлуатаційні властивості плазмотронів. Частинки порошку в такій конструкції прогріваються і мають велику швидкість руху, прискорюються, що також підвищує якість покриття. Експериментальні дослідження дозволяють визначити найбільш ефективно працюючі розміри насадок. Запропонована і випробувана конструкція насадки має систему охолодження і виконана з певних матеріалів серед яких нержавіючі і ізолюючі. Лабораторні випробування плазмотрона розробленої конструкції при модернізації показали, що час безперервної його роботи становить не менше 30 годин при потужності близько 50 кВт при високій якості напилення.

Ключові слова: плазмове напилення; середа; плазмотрон; особливості; конст-рукція; аналіз; результати.

Поступила (received) 01.05.2019